

И. В. Уваров¹, мл. науч. сотр.,
 О. В. Морозов¹, ст. науч. сотр.,
 И. А. Козин¹, электроник,
 А. В. Постников¹, ст. науч. сотр.,
 И. И. Амиров¹, д-р физ.-мат. наук, зам. дир-ра,
 В. А. Кальнов², канд. техн. наук, уч. секр.

¹ Ярославский Филиал Учреждения Российской академии наук Физико-технологического института РАН, г. Ярославль, e-mail: ilnik88@mail.ru

² Учреждение Российской академии наук физико-технологический институт РАН, г. Москва

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА С ПОВЫШЕННЫМ ФАКТОРОМ ДЕМПФИРОВАНИЯ

Поступила в редакцию 04.10.2011

Исследуются динамические характеристики чувствительного элемента (ЧЭ) заданной конструкции, обеспечивающей повышенное воздушное сопротивление. Возбуждение колебаний инерционной массы (ИМ) осуществляется с помощью пьезоэлемента, регистрация колебаний выполняется по отклонению лазерного луча от поверхности ИМ. Получены зависимости резонансной частоты и добротности ЧЭ от давления воздуха в диапазоне от 1 до 10^5 Па, а также зависимость добротности от размера воздушного зазора между ИМ и подложкой.

Ключевые слова: маятниковый микроакселерометр, чувствительный элемент, инерционная масса, резонансная частота, добротность, воздушное демпфирование

Введение

Микроакселерометр (МА) с чувствительным элементом (ЧЭ) в виде упругой консоли или микробалки с инерционной массой (ИМ) является наиболее распространенным типом инерциальных микромеханических устройств [1, 2]. Параметры МА определяются конструкцией и степенью демпфирования его ЧЭ. Демпфирование, обусловленное сопротивлением воздуха, зависит не только от значения воздушного зазора вокруг ЧЭ, но также и от геометрии ЧЭ. Цель работы — исследование динамики ЧЭ заданной конструкции, обеспечивающей повышенное воздушное сопротивление.

Исследуемый ЧЭ и измерительный стенд

Чувствительный элемент представлял собой ИМ, подвешенную на двух микробалках (рис. 1). Он изготовлялся в кремниевой пластине с использованием процессов глубокого плазменного травления. На противоположной стороне от подвесов ИМ и кремниевая пластина имели встречно-штыревую структуру (ВШС). Такая структура была изготовлена для реализации высокочувствительного интерферометрического метода детектирования перемещения ИМ [3]. Для увеличения демпфирующих свойств ИМ была выполнена в виде мембраны, в центре которой находился объем кремния (рис. 1). Размеры мембраны составляли $1,4 \times 1,4$ мм, значение ИМ составляло 2,3 мг. Были изготовлены образцы с толщиной подвесов от 12 до 25 мкм.

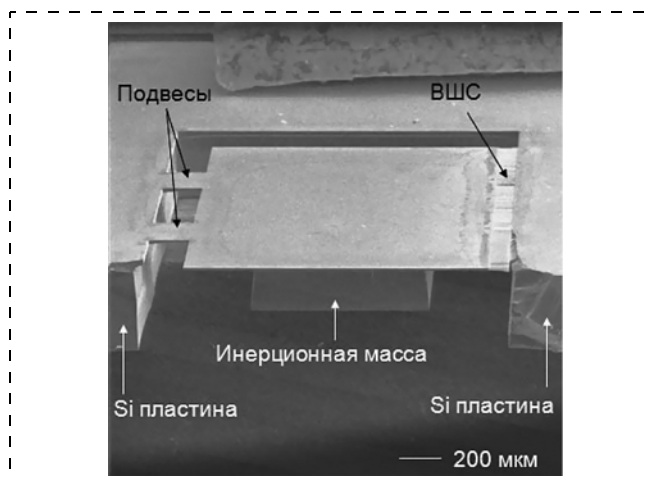


Рис. 1.

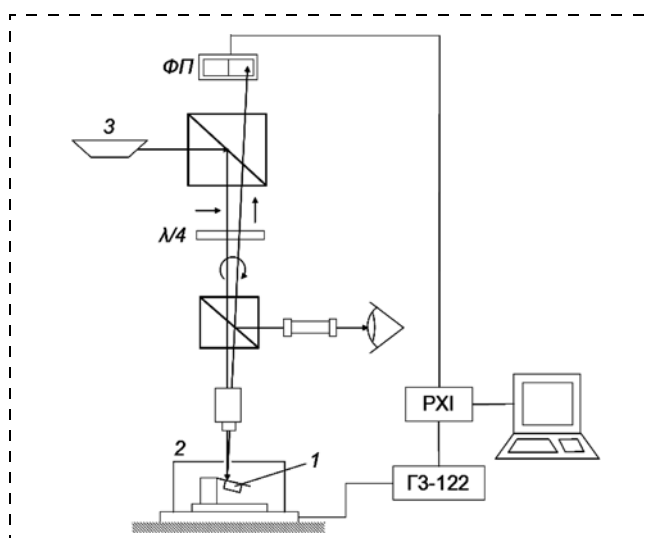


Рис. 2.

Измерение резонансных характеристик проводили на собранном в ЯФ ФТИАН оптическом стенде, схема которого изображена на рис. 2. Образец 1, закрепленный на пьезоэлементе (воздушный зазор между поверхностью ИМ и поверхностью пьезоэлемента составлял 200 мкм), был помещен в вакуумную камеру 2.

На пьезоэлемент подавалось переменное напряжение от генератора ГЗ-122, таким образом возбуждались колебания ИМ. Луч лазера 3 фокусировался на поверхность ИМ, колебания которой вызывали отклонение отраженного луча от начального положения, это отклонение фиксировал фотоприемник ФП. Сбор данных с ФП, а также управление генератором ГЗ-122 осуществлялись с помощью платформы PXI National Instruments и программного обеспечения, написанного в среде графического программирования LabView. Измерения проводили при различных значениях давления воздуха в камере (от 1 до 10^5 Па). Строились резонансные кривые образца, по ним определялись его резонансные частоты и добротности (по отношению резонансной частоты к ширине резонансного пика по частоте на уровне убывания его высоты в $\sqrt{2}$ раз). В таблице представлены значения резонансных частот и добротностей нескольких образцов при давлениях воздуха 1 и 10^5 Па.

Основная резонансная частота балки длиной L , толщиной t , выполненной из материала с модулем Юнга E и плотностью ρ , задается выражением [4]

$$F_p = 1,03 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (1)$$

Согласно (1) резонансная частота F_p балки пропорциональна ее толщине. Подвесы ИМ имели более сложную форму, поэтому зависимость резонансной частоты ЧЭ от толщины подвесов была смоделирована в пакете COMSOL Multiphysics (метод конечных элементов). Смоделированные резонансные частоты ЧЭ находились в согласии с экспериментально полученными данными. Резонансная частота ЧЭ линейно возрастала приблизительно от 500 Гц до 3 кГц при увеличении толщины подвесов от 12 до 25 мкм.

Зависимость резонансной частоты и добротности ЧЭ от давления воздуха

При изменении давления воздуха от 1 до 10^5 Па наблюдался небольшой сдвиг резонансной частоты образцов. Чем выше было значение резонансной частоты образца, тем сильнее она смещалась по абсолютной величине при переходе от вакуума к стандартным условиям. Однако относительное смещение от значения резонансной частоты зависело слабо и для всех образцов составляло не более 0,3 % (см. таблицу).

График зависимости добротности нескольких образцов от давления воздуха показан на рис. 3. Рассматриваемый диапазон давлений можно было разбить на три области, на каждой из которых преобладал соответствующий источник потерь энергии [5]. В диапазоне от 1

№ образца	F_{p1} , Гц (1 Па)	F_{p2} , Гц (10^5 Па)	ΔF , Гц	$\Delta F/F_{p1}$, %	Q_1 (1 Па)	Q_2 (10^5 Па)
1	1000,60	997,95	2,65	0,27	12872	260
2	1007,35	1004,75	2,60	0,26	4579	283
3	1416,47	1412,50	3,97	0,28	6696	248
4	1418,19	1414,50	3,69	0,26	7340	314
5	1441,08	1437,50	3,58	0,25	10293	411
6	1587,38	1583,30	4,08	0,26	7215	422
7	1905,11	1900,25	4,86	0,25	3346	413
8	2275,62	2269,00	6,62	0,29	6197	353

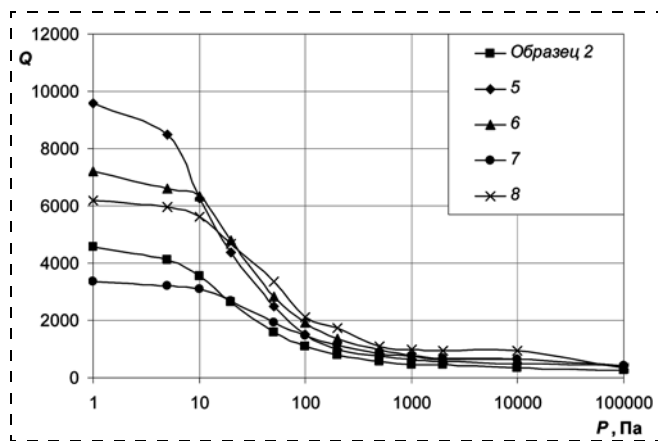


Рис. 3.

до 10 Па основную роль играли потери энергии, происходящие в подвесах ЧЭ при их изгибе (*thermoelastic damping*). В данном диапазоне давлений добротность ЧЭ достигала максимального значения и слабо зависела от давления. Исследуемые образцы имели добротность от 3000 до 13000.

Диапазон давлений от 10 до 10^3 Па соответствовал молекулярному режиму — не взаимодействующие друг с другом частицы среды сталкивались с движущимся ЧЭ. В данном режиме добротность ЧЭ уменьшалась с увеличением давления воздуха в камере.

Давлениям воздуха от 10^3 до 10^5 Па соответствовал вязкостный режим, при этом добротность ЧЭ также слабо зависела от давления, но достигала минимального значения.

Влияние воздушного зазора между поверхностью ИМ и подложкой на добротность ЧЭ

Для задания требуемого коэффициента демпфирования в инерциальных микромеханических устройствах широко используется эффект сжатия воздуха в зазоре между элементами устройства (*squeezed-film damping*). Добротность ЧЭ, соответствующая этому эффекту, задается выражением [6]:

$$Q = \frac{F_p m \pi^4 h_0^3}{96 \eta L W^3}, \quad (2)$$

где F_p — резонансная частота ЧЭ; h_0 — толщина воздушного зазора; η — вязкость воздуха; L и W — длина и ширина поверхности ЧЭ, создающей сжатие воздуха.

Была исследована зависимость добротности ЧЭ от значения воздушного зазора между поверхностью мембраны и поверхностью, на которую устанавливался ЧЭ (поверхностью пьезоэлемента). Измерения проводили при атмосферном давлении (вязкостный режим). Для создания различных воздушных зазоров образцы устанавливали на полиимидные пленки различной толщины (30, 40, 45, 70, 85 и 145 мкм). Толщину пленок определяли микрометром с точностью 1 мкм.

Зависимость добротности нескольких образцов от значения воздушного зазора показана на рис. 4. Также на графике представлена теоретическая кривая, рассчитанная с помощью выражения (2) для ЧЭ, имеющего резонансную частоту 1 кГц. При воздушных зазорах от 30 до 100 мкм экспериментальные кривые лежали выше теоретической. Возможно это было связано с ошибкой в определении размера воздушного зазора. Воздушный зазор превышал измеренную толщину используемых полиимидных пленок вследствие наличия посторонних частиц между пленкой и образцом и шероховатостей пленок. Также ошибки в определении размера зазора могли быть обусловлены изгибами экспериментальных кривых в области 40–45 мкм. Однако при зазорах 100...140 мкм экспериментальные кривые не уходили вверх так круто, как теоретическая кривая. Это было связано с тем, что с увеличением зазора эффект сжатия воздуха на самом деле постепенно ослабевал и экспериментальные кривые выходили на насыщение.

Для подавления нежелательных колебаний акселерометра необходимо, чтобы коэффициент демпфирования ξ составлял $\sim 0,5$, что соответствует добротности ~ 1 ($Q = 1/2\xi$) [2]. Экстраполяция экспериментально полученных зависимостей (рис. 4) на диапазон $h < 30$ мкм показывает, что требуемое значение добротности для ЧЭ исследуемой конструкции должно достигаться при $h \approx 20$ мкм.

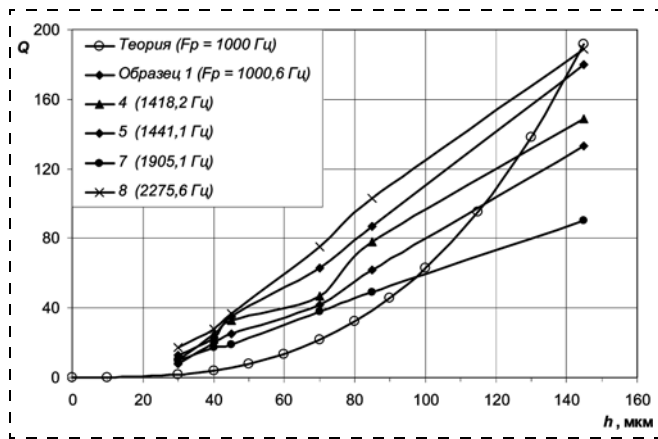


Рис. 4.

Порог чувствительности ЧЭ по ускорению был определен из отношения сигнал/шум (SNR) [7]:

$$SNR = \frac{a_s^2 m Q}{4k_b T \omega_0}, \quad (3)$$

где a_s — измеряемое ускорение; k_b — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. В качестве шума в выражении (3) выступает броуновский шум ЧЭ. Отношение сигнал/шум полагалось равным 1. Порог чувствительности ЧЭ, имеющего массу 2,3 мг, резонансную частоту порядка 1 кГц и добротность, равную 5, составлял $1 \cdot 10^{-6}$ м/с², что соответствует порогу чувствительности современных МА.

Заключение

В ходе работы были исследованы динамические характеристики (резонансная частота и добротность) ЧЭ заданной конструкции. Были получены зависимости резонансной частоты и добротности ЧЭ от давления воздуха в диапазоне от 1 до 10^5 Па. Также была исследована зависимость добротности ЧЭ от значения зазора между мембраной ЧЭ и подложкой. Мембрана ЧЭ позволяет увеличить площадь поверхности, создающей сжатие воздуха в зазоре, и за счет этого увеличить коэффициент демпфирования. Экспериментальные данные показали, что для достижения требуемого коэффициента демпфирования необходимо обеспечить воздушный зазор ~ 20 мкм между поверхностью мембраны и подложкой, на которую устанавливается ЧЭ.

Список литературы

1. Распопов В. Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
2. Kaajakari V. Practical MEMS. Small Gear Publishing, 2009. 460 p.
3. Cooper E. B., Post E. R., Griffith S. et al. High-resolution micromachined interferometric accelerometer // Applied Physics Letters. Vol. 27. 2000.
4. Bannon F. D., Nguyen C. T.-C. High-Q HF Microelectromechanical Filters. // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2000. Vol. 35.
5. Blom F. R., Bouwstra S., Elwenspoek M. et al. Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry // Journal of Vacuum Science & Technology B. 1992. Vol. 10.
6. Brotz J. Damping in CMOS-MEMS resonators. Master's project report in Electrical & Computer Engineering at Carnegie Mellon University, 2004. 87 p.
7. Gabrielson T. B. Fundamental noise limits in miniature acoustic and vibration sensors. Warminster, PA, Naval Air Development Center, 1991. 101 p.

УДК 621.3.049.77

О. В. Чуйко, инженер,
А. Е. Кузнецов, нач. лаб.,
ФГУ НПК "Технологический Центр", Москва
e-mail: O. Chuyko@tcen.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУР В КАЧЕСТВЕ рН-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Поступила в редакцию 04.10.2011

Исследованы рН-чувствительные элементы, выполненные на основе кремниевых наноструктур. Формирование наноструктур осуществлялось методом "top-down" ("сверху—вниз"). Нанопроволочные структуры характеризуются более высокой чувствительностью. Интегрированный элемент на основе двух нанопроволок р- и n-типов может быть использован в качестве датчика локального относительного изменения концентрации $[H^+]$.

Ключевые слова: ISFET, рН, кремниевые нанопроволоки, чувствительность

Развитие аналитической химии соответствует общей тенденции миниатюризации техники. Существует объективная необходимость в уменьшении размеров сенсорных элементов, расширении диапазона чувствитель-

ности и качественном изменении их конструкции, позволяющих фиксировать и оценивать прежде недоступные непосредственным измерениям параметры процессов. Все большее распространение получают полифункциональные измерительные ячейки, позволяющие проводить одновременные измерения нескольких физических величин исследуемого объекта, в частности концентрацию $[H^+]$.

В работе рассмотрены возможности использования различных наноструктур кремния в качестве рН-чувствительных элементов. Формирование наноструктур осуществлялось методом "top-down" ("сверху—вниз") с использованием литографических приемов конструирования.

Технология изготовления рН-чувствительных элементов на основе кремниевых наноструктур включает в себя комбинацию двух основных этапов: формирование кремниевых структур с наноразмерами и последовательность операций КМОП-процесса. Нанопроволочные элементы изготавливались на двух типах структур — кремнии на изоляторе (КНИ) и поликремнии методами фотолитографии и последовательного утонения окислением с вариацией по длине и ширине проволок.

Далее последовательностью технологических операций формировались n-канальные транзисторы с длиной канала от 0,5 до 0,8 мкм и диаметром кремниевой про-